



Universidad
Politécnica
de Cartagena

GRADO EN INGENIERÍA CIVIL

Abastecimiento de aguas

TEMA 14 Cálculo mecánico de tuberías

Francisco Javier
Pérez de la Cruz

Juan García Bermejo



ÍNDICE

1. CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE SU RESISTENCIA MECÁNICA

2. ACCIONES DE CÁLCULO

3. HIPÓTESIS PÉSIMA DE CARGA

Tubos sometidos a presión hidráulica interior

Tubos con funcionamiento en lámina libre

4. MÉTODOS DE CÁLCULO PARA LAS ACCIONES

5. DIMENSIONAMIENTO DE LA TUBERÍA

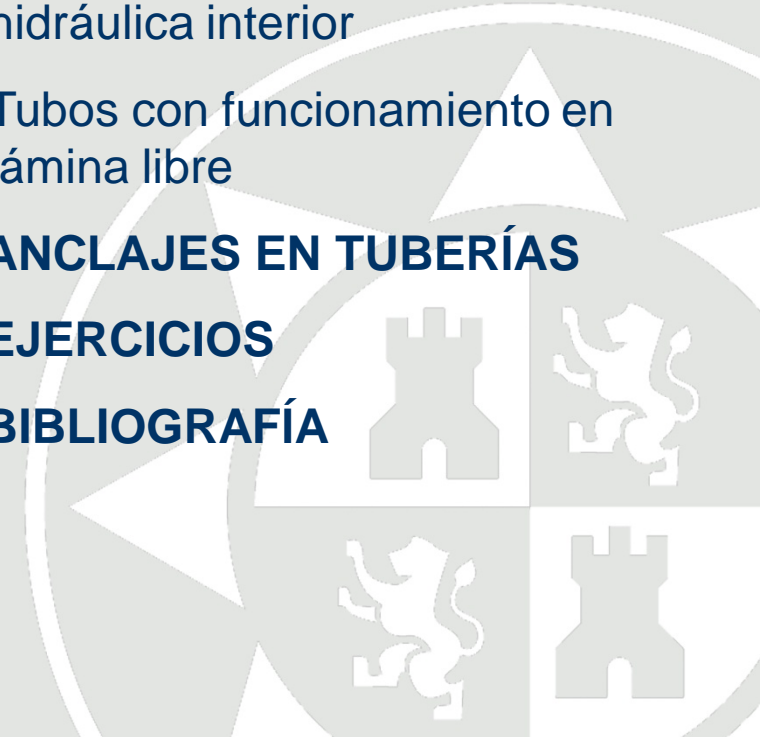
Tubos sometidos a presión hidráulica interior

Tubos con funcionamiento en lámina libre

6. ANCLAJES EN TUBERÍAS

7. EJERCICIOS

8. BIBLIOGRAFÍA





1. CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE SU RESISTENCIA MECÁNICA

Es muy frecuente la división de los tubos en *rígidos* y *flexibles* según sea su comportamiento mecánico ante las solicitaciones a que estén expuestos, si bien no es muy precisa la frontera o división entre unos y otros tipos de tuberías.

Crterios tradicionales

La condición de rígido o flexible de un tubo se entendía como una propiedad intrínseca del mismo (capacidad de deformación ante cargas)

1) AWWA (American Water Works Association)

Rígido → Deformaciones de diámetro $< 1\%$

Flexible → Deformaciones de diámetro $> 3\%$

Semirrígido → Situación intermedia entre ambas

2) Howard

Criterio de clasificación según el valor de la rigidez circunferencial del tubo (S_c)



$$S_c = \frac{E}{12} \left(\frac{e}{D_m} \right)^3$$

E → Módulo de elasticidad del material del tubo

e → Espesor del tubo

D_m → Diámetro medio del tubo

Así los tubos se clasificarían de la siguiente forma:

$S_c < 10 \text{ T/m}^2$ → Tubos flexibles

$10 < S_c < 20 \text{ T/m}^2$ → Tubos semirrígidos

$S_c > 20 \text{ T/m}^2$ → Tubos rígidos

Nuevos enfoques en la clasificación

Hoy en día, la tendencia más aceptada es entender la condición de rígido o flexible no como una propiedad del tubo analizado de forma individual, sino del conjunto que forma el propio tubo con el terreno que lo rodea y las condiciones de la instalación, de manera que, la posibilidad de que un tubo en unas condiciones determinadas sea una estructura flexible y en otras rígida ya no dependerá sólo de la geometría, sino también del tipo de relleno que lo rodee, de la compactación alcanzada, etc.



Por tanto podemos definir:

- 1) *Tubos flexibles* → Aquellos que admiten ciertas deformaciones por la acción de las cargas verticales, produciéndose un efecto de ovalización que, al aumentar el diámetro horizontal, hace que entren en juego los empujes pasivos del terreno, aumentando de forma considerable su resistencia.

Se dimensionan para que la deformación causada por la acción de las cargas externas no supere un valor del orden del 3 – 6% del diámetro, no alcanzándose para entonces el agotamiento (ya que pueden alcanzar deformaciones de hasta el 20%).

- 2) *Tubos rígidos* → La deformación por la acción de las cargas ovalizantes es tan pequeña que no se benefician del posible empuje pasivo del terreno, sino que absorbe todas las sollicitaciones el propio tubo.

En este caso, el tubo queda fuera de servicio cuando el estado tensional en la pared excede el valor admisible.

- 3) *Tubos semirrígidos* → Estadio intermedio entre los anteriores. Son aquellos que admiten cierta deformación ante las cargas externas, la cual es suficiente para modificar el empuje de las tierras.



ABASTECIMIENTO DE AGUAS

Tema 14. Cálculos mecánicos de tuberías



Otra forma de entender la rigidez o flexibilidad de un tubo se recoge en la norma UNE-CEN/TR 1295-3:2011 IN donde se introduce un criterio de clasificación a partir del parámetro que denomina rigidez relativa (S_r):

$$S_r = \frac{E'}{8S_c(1-\nu_s^2)}$$

E' → Módulo de elasticidad o de reacción del relleno de la zanja

ν_s → Módulo de Poisson del suelo (generalmente 0,3)

S_c → Rigidez circunferencial de la tubería

Se considera que la tubería se comporta como rígida cuando $S_r \leq 9$ y como flexible cuando $S_r > 24$. Sin embargo, aquellos casos en los que la S_r está comprendida entre 9 y 24 se suelen denominar tuberías semirrígidas caracterizadas porque su deformada mantiene una forma elíptica.





ABASTECIMIENTO DE AGUAS



Tema 14. Cálculos mecánicos de tuberías

En cualquier caso, sí puede decirse que, en general, los tubos de acero y los de materiales plásticos (PVC-U, PE, PRFV) se comportan siempre o casi siempre de manera flexible, que los de hormigón lo hacen de forma rígida y que la fundición tendría un comportamiento semirrígido, ya que éste variará de rígido a flexible según diámetros.

E' suelo N/mm^2	Tubos de fundición						
	Rigidez anular del tubo, S_c (N/mm^2)						
	0,016	0,03	0,1	1	5	10	14
0,6	5	3	1	0	0	0	0
1	9	5	1	0	0	0	0
5	43	23	7	1	0	0	0
10	86	46	14	1	0	0	0
15	129	69	21	2	0	0	0
20	172	92	27	3	1	0	0
25	215	114	34	3	1	0	0
30	258	137	41	4	1	0	0
35	300	160	48	5	1	0	0



Comportamiento flexible



Comportamiento semirrígido



Comportamiento rígido

Comportamiento flexible o rígido en los tubos de fundición en función de su rigidez relativa (S_r)



2. ACCIONES DE CÁLCULO

Acción → Toda causa capaz de originar una sollicitación o efecto en la tubería.

Las principales acciones que, en general, deben considerarse en el cálculo mecánico de la tubería son las siguientes:

- a) Acciones gravitatorias → Aquellas que se producen por los elementos constructivos de la tubería y las que puedan aparecer por razón de su uso.
 - a.1) *Peso propio* → Es la carga debida al peso de la tubería.
 - a.2) *Cargas permanentes o cargas muertas* → Son las debidas a los pesos de los posibles elementos constructivos o instalaciones fijas que tenga que soportar la tubería.
 - a.3) *Sobrecargas de uso* → Son aquellas cargas derivadas del uso de la tubería y cuya magnitud y/o posición puede ser variable a lo largo del tiempo. Son, básicamente, las siguientes:
 - a.3.1) Carga debida al peso del agua en el interior de la tubería
 - a.3.2) Presión interna actuante, incluyendo el golpe de ariete



- b) Acciones del terreno → Son las producidas tanto por el empuje activo como por el empuje pasivo del terreno. En su determinación deben tenerse en cuenta las condiciones de instalación de la tubería, así como que ésta sea rígida o flexible, el tipo de apoyo, el tipo de relleno, la naturaleza del terreno, etc.
- c) Acciones del tráfico → Son las producidas por la acción de los vehículos que puedan transitar sobre la tubería.

Estas acciones derivadas del tráfico son, por su propia naturaleza, unas sobrecargas puntuales que, además, tendrían la consideración de “acciones dinámicas”, las cuales actúan con un cierto impacto. Por ello, al determinar su valor hay que multiplicar a la propia sobrecarga por un “coeficiente de impacto” que tenga en cuenta esta circunstancia.

Las acciones más determinantes en el dimensionamiento de tuberías enterradas suelen ser la presión interna (acciones internas), así como las acciones del terreno y las del tráfico (acciones externas).

- d) Acciones climáticas → Son las derivadas de los fenómenos climatológicos.
- d.1) Acciones del viento → Son las producidas por las presiones y succiones que el viento origina sobre la superficie de la tubería.



- d.2) *Acciones térmicas* → Son las producidas por las deformaciones debidas a los cambios de temperatura.
- d.3) *Acciones de la nieve* → Son las originadas por el peso de la nieve que, en las condiciones climatológicas más desfavorables, podría acumularse sobre la tubería
- e) *Acciones debidas al nivel freático* → Es el empuje hidrostático generado por el agua subterránea.
- f) *Acciones reológicas* → Son las producidas por las deformaciones que experimentan los materiales en el transcurso del tiempo por retracción, fluencia bajo las cargas u otras causas.
- g) *Acciones sísmicas* → Son las producidas por las aceleraciones de las sacudidas sísmicas.





3. HIPÓTESIS PÉSIMA DE CARGA

Se entiende por "hipótesis pésima de carga" en una sección de una tubería a la combinación de acciones de cálculo que produzca la máxima sollicitación o deformación en esa sección.

Por "combinación de acciones", la EHE (artículo 13) entiende el "conjunto de acciones compatibles que se considerarán actuando simultáneamente para una comprobación determinada. Cada combinación, en general, estará formada por las acciones permanentes, una acción variable determinante y una o varias acciones variables concomitantes. Cualquiera de las acciones variables puede ser determinante".





Tubos sometidos a presión hidráulica interior

En las *instalaciones aéreas*, para todas las tipologías de materiales, la hipótesis pésima de carga suele corresponder bien al estado tensional en la pared del tubo derivado de la sola acción de la presión interior, o bien a la flexión longitudinal producida por las acciones gravitatorias, si bien, en ocasiones, puede haber alguna otra situación también condicionante, como el pandeo, las posibles tracciones longitudinales o las tensiones en los apoyos, etc.

En las *instalaciones enterradas* (lo más habitual), usualmente, las más determinantes son:

- a) La presión interior actuante (a.3.2)
- b) Las acciones del terreno (b)
- c) Las del tráfico (c)

de manera que la hipótesis pésima de carga suele producirse por la combinación de las acciones que se indican a continuación, según las diferentes tipologías de tuberías.



- 1) Tubos de acero → Las solicitaciones condicionantes suelen ser el estado tensional producido por la sola acción de la presión interna o las deformaciones causadas en la hipótesis de actuación única de las acciones externas. En estos tubos se debe comprobar, además, el comportamiento ante el pandeo o colapsado.
- 2) Tubos de hormigón → La situación más desfavorable es el estado tensional causado por la acción de las cargas externas e internas, bien individualmente o bien en conjunto.
- 3) Tubos de materiales plásticos (PVC, PE y PRFV) → Las solicitaciones condicionantes son el estado tensional (causado bien por la acción individual de la presión interna, o bien junto a las acciones externas), o las deformaciones causadas por las acciones externas, debiendo en estos tubos plásticos comprobar también el comportamiento ante el pandeo transversal o colapsado.
- 4) Tubos de fundición → En el caso de diámetros grandes las solicitaciones condicionantes serían el estado tensional producido por la sola acción de la presión interna o las deformaciones causadas en la hipótesis de actuación única de las acciones externas (comportamiento flexible).


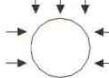
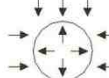


ABASTECIMIENTO DE AGUAS

Tema 14. Cálculos mecánicos de tuberías



En los diámetros pequeños la situación más desfavorable sería el estado tensional causado por la acción de las cargas externas e internas, bien individualmente o bien en conjunto (comportamiento rígido).

Tipo de tubo	Socilitación condicionante	Hipótesis pésima de carga		
		Sólo acciones internas 	Sólo acciones externas 	Carga combinada (acciones internas y externas) 
Acero	Estado tensional			
	Deformaciones			
	Pandeo o colapsado			
Hormigón	Estado tensional			
Fundición	Estado tensional			
	Deformaciones			
PVC-U y PE	Estado tensional			
	Deformaciones			
	Pandeo o colapsado			
PRFV	Estado tensional			
	Deformaciones			
	Pandeo o colapsado			

Hipótesis pésima de carga habituales en los diferentes tipos de tubos a presión en instalaciones enterradas



En resumen, las comprobaciones que hay que hacer en las tuberías enterradas son las siguientes:

- a) **Tensiones debidas exclusivamente a la presión hidráulica interior** → En cualquier tipología de tubería, debe comprobarse que, al actuar únicamente la presión hidráulica interior, las tensiones producidas en la pared del tubo no exceden los valores admisibles.
- b) **Tensiones debidas a la acción conjunta de la presión hidráulica interior y de las acciones externas** → En los tubos de hormigón y en los de materiales plásticos (PVC, PE y PRFV), debe comprobarse que la actuación conjunta de la presión interior y de las acciones externas produce un estado tensional inferior al admisible.

En estos tubos, determinadas combinaciones de presiones interiores (P) y momentos flectores debidos a las cargas externas (W) agotan la tubería. Los primeros estudios que profundizaron sobre el tema se realizaron para los tubos de fibrocemento, para los que, tradicionalmente, se representaban dichas combinaciones mediante la parábola de Schlick (Hüneberg, 1971), de forma que la curva que representa estados de agotamiento de la tubería venía representada por la siguiente ecuación:



$$\frac{W}{W_r} = \sqrt{1 - \frac{P}{P_r}}$$

$W \rightarrow$ Momento flector de aplastamiento

$W_r \rightarrow$ Momento flector de rotura al aplastamiento

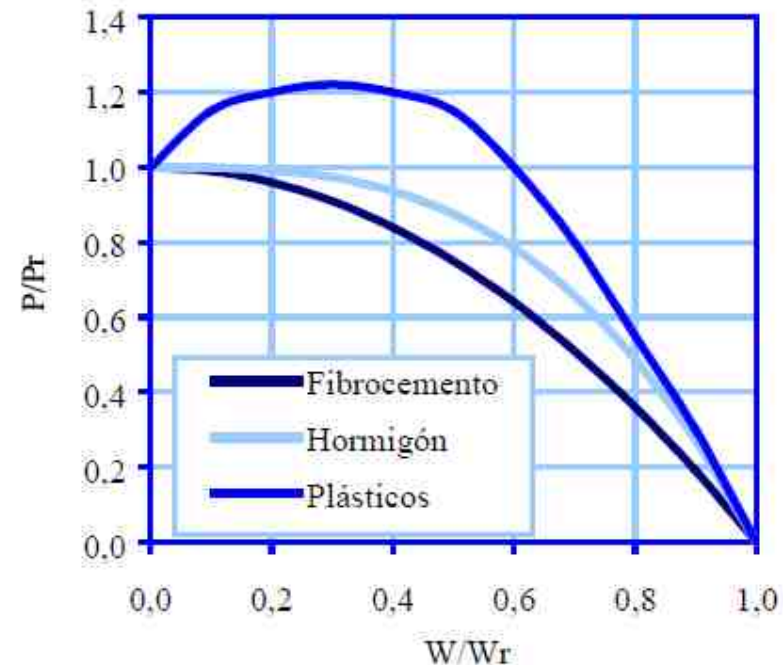
$P \rightarrow$ Presión interna

$P_r \rightarrow$ Presión interna de rotura

En los tubos de hormigón pretensado, dicha curva viene representada por una ecuación similar (Moser, 1990):

$$\frac{W}{W_r} = \sqrt[3]{1 - \frac{P}{P_r}}$$

En los tubos de materiales plásticos, la curva que representa los valores de W y P que agotan la tubería es algo diferente (Liria, 1995), del estilo de la mostrada en la figura adjunta.





En ella puede verse que la presión máxima soportable es superior a la presión aislada de rotura, ya que la presión interior anula parte de las flexiones producidas por las acciones externas, disminuyendo las ovalizaciones, de forma que la combinación de sollicitaciones es mejor para el estado tensional.

Esta comprobación del estado tensional derivado de la acción de las cargas combinadas no suele realizarse ni en los tubos de fundición ni en los de acero.

- c) Tensiones debidas a la acción exclusiva de las acciones externas** → En los tubos de hormigón y en los de materiales plásticos, debe comprobarse que, por la sola acción de las cargas externas, no se alcanza el estado tensional último.
- d) Deformaciones causadas exclusivamente por las acciones externas** → En todas las tipologías (salvo el hormigón), debe comprobarse que las deformaciones causadas por la sola acción de las cargas externas no excede del 3 o el 6% del diámetro del tubo, según materiales y diámetros.
- e) Deformación causada por la acción conjunta de las acciones externas y de la presión interna** → En los tubos de materiales termoplásticos (PVC-U y PE) debe comprobarse que la deformación causada por la acción conjunta de ambas acciones no excede el 5% del diámetro del tubo.



- f) **Pandeo transversal o colapsado producido por la acción de las acciones externas y de la posible presión interna negativa** → Debe comprobarse en los tubos de acero y de materiales plásticos (PVC, PE y PRFV).

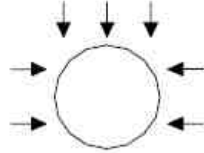


Rotura de una tubería de PVC por efecto de cargas externas



Tubos con funcionamiento en lámina libre

En este caso, mucho más sencillo que el anterior, la hipótesis pésima de carga corresponde al estado tensional o deformacional en la hipótesis de actuación única de las cargas externas, conforme puede verse en la tabla adjunta.

<i>Tipo de tubo</i>	<i>Solo acciones externas</i>  <i>Solicitud condicionante</i>
Hormigón	Estado tensional
PVC-U y PE	Estado tensional Deformaciones
PRFV	Estado tensional Deformaciones

Hipótesis pésima de carga habituales en los diferentes tipos de tubos en instalaciones enterradas en lámina libre



4. MÉTODOS DE CÁLCULO PARA LAS ACCIONES

Para la determinación de las acciones pueden utilizarse distintos métodos de cálculo, si bien para las acciones más determinantes (terreno y tráfico) en España los más habituales son los siguientes:

1) Acciones del terreno

Estas acciones, en las tuberías enterradas se han venido calculando tradicionalmente en España mediante las **teorías de Marston**, desarrolladas en la Universidad de Iowa (EE.UU.), entre los años 1910 y 1920.

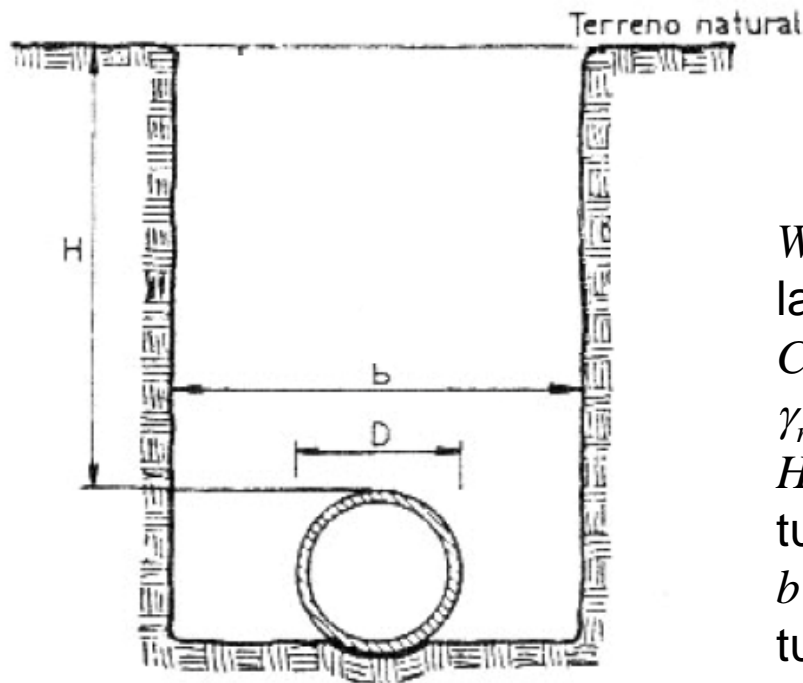
Las teorías de Marston son sobre todo de aplicación para los tubos rígidos (hormigón), en los cuales se aplica un coeficiente reductor a la carga obtenida.

En los tubos de acero, por el origen norteamericano de la mayoría de la normativa existente al respecto, es también práctica habitual utilizar la teoría de Marston para el cálculo de las acciones del terreno, si bien en este caso no se suele emplear ningún coeficiente reductor, lo que supone una seguridad adicional. Y en los tubos de fundición y de PRFV, es también práctica habitual seguir este procedimiento.



Simplificadamente, la teoría de Marston consiste en suponer que la carga vertical debida al peso de las tierras (W_e) es el peso del prisma de relleno situado justo por encima de la tubería, menos la resistencia a cortante a lo largo de los lados verticales de dicho prisma.

Dicha disminución hace que se emplee un coeficiente reductor que minore el peso teórico del prisma de relleno situado sobre el tubo:



$$W_e = C_z \cdot \gamma_r \cdot b \cdot H$$

W_e → Carga vertical debida al peso de las tierras (kN/m)

C_z → Coeficiente reductor

γ_r → Densidad del relleno (kN/m³)

H → Altura de tierras sobre la clave del tubo (m)

b → Ancho de la zanja en la clave del tubo (m)



El coeficiente C_z depende del tipo de instalación (en zanja, en terraplén, en zanja terraplenada), de la profundidad de enterramiento, del diámetro del tubo y de las características del relleno. En el caso genérico de zanja estrecha, su valor viene dado por la siguiente expresión:

$$C_z = \frac{1 - e^{-2C_1 \frac{H}{b}}}{2C_1 \frac{H}{b}}$$

siendo C_1 un parámetro que depende de la naturaleza geotécnica del terreno (varía desde 0,192 si se trata de rocas machacadas a 0,11 si son arcillas plásticas).

Las fórmulas anteriores están deducidas en la hipótesis de que , al ser más rígida la tubería que los rellenos laterales, estos ceden y la tubería tiene que soportar las cargas que actúan sobre todo el ancho de la zanja (normalmente no se tienen en cuenta los empujes laterales).



Cuando la tubería es flexible (o, por lo menos, el terreno que la rodea es más rígido que la tubería) y se emplea la teoría de Marston para el cálculo de las acciones del relleno, la tubería sólo tiene que resistir las cargas que actúan sobre un ancho igual a su diámetro externo, ya que se entiende que la tubería se va a deformar por dichas acciones verticales y, en consecuencia, va a transmitir a los rellenos laterales parte de las cargas verticales. De esta forma, la expresión genérica anterior se transforma en:

$$W_e = C_z \cdot \gamma_r \cdot OD \cdot H$$

Como se ha indicado, en ocasiones, en la aplicación de la teoría de Marston en tubos flexibles no se emplea el coeficiente reductor de las cargas C_z , estando entonces del lado de la seguridad.

Para comprobar con detalle el desarrollo genérico de la teoría de Marston para cualquier material se puede consultar en España la IET-80 y en EE.UU. El “Manual M9. Concrete pressure pipe” de la AWWA.



En los años 1980, se ha desarrollado en Alemania el conocido como **método ATV** de aplicación para todos los tipos de materiales, pero especialmente para las tuberías flexibles o semirígidas. En España es el método que se emplea habitualmente para el cálculo de las acciones del terreno en los tubos de PVC-U y en los de PE, y, en ocasiones, también en los de PRFV.

Se basa en el cálculo de los momentos en la pared del tubo teniendo en cuenta, de la forma más precisa posible, la influencia de las deformabilidades del terreno y del tubo, considerando no sólo la carga vertical sobre el tubo, sino también el empuje horizontal de las tierras.



En el caso de instalación en zanja, la carga vertical del relleno viene dada por:

$$W_e = m_v \cdot C_z \cdot \gamma_r \cdot H$$

Siendo:

W_e → Carga vertical debida al peso de las tierras (kN/m²)

m_v → Factor de concentración de la presión vertical que tenga en cuenta que, a consecuencia de las distintas deformaciones del tubo y del suelo que lo rodea, la carga vertical sobre el tubo puede ser mayor o menor que la soportada por las tierras que lo rodean.

C_z → Coeficiente reductor de la carga análogo al de la teoría de Marston, si bien de cálculo más complejo en este caso (depende de más parámetros)

En este caso es fundamental la consideración de los empujes laterales del terreno (q_h), los cuales se calculan mediante la siguiente expresión (también para el caso de instalación en zanja):



$$q_h = m_h \cdot K_2 \cdot C_z \cdot \gamma_r \cdot H$$

m_h → Factor de concentración de la presión lateral

K_2 → Coeficiente de empuje lateral de las tierras del relleno

Por último, existe otra posibilidad, desarrollada en Francia en los años 1990, que es el conocido como **método del Fascículo 70 (F-70:2001)**, de aplicación también, en principio, para todas las tipologías de materiales, si bien en España se utiliza solo en ocasiones para los tubos de fundición.

En el caso de instalación en zanja, la carga vertical del relleno viene dada por:

$$W_e = C_z \cdot \gamma_r \cdot H$$

donde C_z es un factor de concentración, que en los tubos flexibles o semirrígidos toma valor 1 y que en los tubos rígidos se calcula según la teoría de Marston.



El empuje lateral del terreno (q_h), por su parte, se calcula mediante la siguiente expresión (también en el caso genérico de instalación en zanja):

$$q_h = K_2 \cdot W_e$$

donde K_2 es un coeficiente que depende de la naturaleza y grado de compactación del relleno de la zanja.

2) Acciones del tráfico

En los tubos de acero y hormigón, de forma clásica, las acciones del tráfico se han venido calculando mediante las teorías de Boussinesq.





Dichas teorías se encuentran desarrolladas (con pequeñas variaciones entre unas fuentes y otras) en la norma DIN 1072:1985 o en la IET-80.

En los tubos de PVC-U y en los de PE (y también en ocasiones en los de PRFV), de manera análoga a las acciones del terreno, en España suele emplearse el método ATV para la determinación de las acciones del tráfico.

Por último, en los tubos de fundición y de PRFV pueden emplearse los procedimientos específicos previstos en las normas UNE-EN 545:1995 y AWWA C950 (o en el Manual AWWA M45), respectivamente.

Acción	Tubos de fundición	Tubos de acero	Tubos de hormigón	Tubos de PVC y PE	Tubos de PRFV
Terreno	UNE-EN545:1995 y F-70:2001	Marston sin coeficiente reductor	Marston con coeficiente reductor	ATV 127:2000	Marston sin coefcte reductor ó ATV 127:2000
Tráfico	UNE-EN545:1995 y F-70:2001	Boussinesq	Boussinesq	ATV 127:2000	AWWA M45 ó ATV 127:2000

Métodos habituales de cálculo de las acciones del terreno y del tráfico en tuberías enterradas en España



5. DIMENSIONAMIENTO DE LA TUBERÍA

Tubos sometidos a presión hidráulica interior

Los métodos de cálculo habitualmente empleados en España para la comprobación de las solicitaciones pésimas indicadas anteriormente, y en consecuencia recomendados en el dimensionamiento, son los que se indican a continuación:

- a) **Tensiones debidas exclusivamente a la presión hidráulica interior** → La comprobación de que la MDP no excede el valor admisible de la tensión se realiza en los tubos de material homogéneo mediante la fórmula de los tubos delgados:

$$\sigma_{adm} \geq \frac{MDP \cdot C \cdot ID}{2 \cdot e}$$

MDP → Presión máx. de diseño en la sección de la tubería

σ_{adm} → Tensión admisible a tracción del material constitutivo del tubo

C → Coeficiente de seguridad

ID → Diámetro interior del tubo

e → Espesor de la pared del tubo



Simplificadamente, en los tubos que se fabriquen bajo distintas series de presiones nominales (plásticos, básicamente), la comprobación anterior, no obstante, puede sustituirse simplemente por verificar que la PN del tubo sea superior a la presión de servicio, ya que en el concepto de PN va implícito el que el tubo resista en ausencia de cargas externas, y de forma continuada y a largo plazo, una presión igual a la presión de servicio. Debe, en cualquier caso, comprobarse que las sobrepresiones debidas al golpe de ariete son igualmente soportables por el tubo.

b) Tensiones debidas a la acción conjunta de la presión hidráulica interior y de las acciones externas → Los métodos de cálculo habitualmente empleados en España para la determinación del estado tensional por la acción conjunta de las cargas combinadas son muy variados.

Así, por ejemplo, en los tubos de PVC-U y en los de PE, viene en utilizarse desde los años 1990 el método ATV (desarrollado en la norma UNE 53331:1997 IN), mientras que en los de PRFV puede utilizarse bien el mismo método ATV o bien el procedimiento recogido en la norma AWWA C-950 (o en el manual M45 que amplía el contenido de dicha norma). En los tubos de hormigón, por último, suele emplearse la formulación descrita en la IET-80.



- c) Tensiones debidas a la acción exclusiva de las acciones externas** → Para esta comprobación, cuando sea necesaria, se emplean los mismos procedimientos que en el caso anterior.
- d) Deformaciones causadas exclusivamente por las acciones externas** → Esta comprobación suele realizarse mediante la fórmula de Spangler en los tubos de acero y mediante el método ATV en los de PVC-U y PE. En los tubos de PRFV puede utilizarse cualquiera de ambas y en los de fundición, bien la fórmula de Spangler o bien el método del F-70:2001.
- e) Deformación causada por la acción conjunta de las acciones externas y de la presión interna** → Esta comprobación suele realizarse empleando el método ATV en los de PVC-U y en los de PE.
- f) Pandeo transversal o colapsado producido por la acción de las acciones externas y de la posible presión interna negativa** → Para comprobar que por las acciones externas, bien solas o bien en combinación con la presión interna negativa no se produzca la rotura por pandeo, debe verificarse que las acciones totales que solicitan a la tubería no alcancen el valor de la carga crítica de pandeo (P_{crit}) minorada por un coeficiente de seguridad C.



En los tubos de acero y en los de PRFV, la carga crítica de pandeo (P_{crit}) suele calcularse mediante la formulación de Luscher (AWWAM-11 o M-45):

$$P_{crit} = \sqrt{32 \cdot f_f \cdot B' \cdot E' \frac{EI}{D_m^3}}$$

P_{crit} → Carga crítica de pandeo (N/mm²)

E → Módulo de elasticidad del material de la tubería

I → Momento de inercia de la pared de la tubería (mm³) ($I = e^3/12$)

E' → Módulo de reacción del suelo (N/mm²)

D_m → Diámetro medio del tubo (mm)

B' → Coeficiente de origen empírico de valor:

$$B' = 0,015 + 0,041(H/D_m) \quad \text{si } H/DN < 5$$

$$B' = 0,015 + 0,014(H/D_m) \quad \text{si } H/DN > 5$$

H → Altura de tierras por encima de la clave del tubo (mm)



$f_f \rightarrow$ Factor de flotación

$$f_f = 1 - 0,33(H_w/H)$$

$H_w \rightarrow$ Altura del nivel freático sobre el tubo (mm)

En los tubos de materiales termoplásticos, sin embargo, la carga crítica de pandeo (P_{crit}) suele calcularse mediante la siguiente expresión (norma ATV):

$$P_{crit} = 2\sqrt{S_t \cdot S_{sh}}$$

$P_{crit} \rightarrow$ Carga crítica de pandeo (N/mm²)

$S_t \rightarrow$ Rigidez circunferencial específica a largo plazo (N/mm²)

$S_{sh} \rightarrow$ Rigidez horizontal del relleno hasta la clave del tubo (N/mm²)


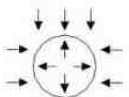
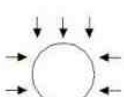
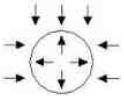
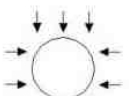
En la diapositiva siguiente se muestra un cuadro resumen con los diferentes métodos para el dimensionamiento de tuberías enterradas empleados en España:



ABASTECIMIENTO DE AGUAS



Tema 14. Cálculos mecánicos de tuberías

Solicitud	Tubos de fundición	Tubos de acero	Tubos de hormigón	Tubos de PVC y PE	Tubos de PRFV
Estado tensional por la presión interna 	Fórmula de los "tubos delgados": $\sigma_{adm} > P \times C \times ID / (2 \times e)$		IET-80	DP<PN	DP<PN
Estado tensional por la carga combinada 			IET-80	ATV 127:2000	AWWA M45 ó ATV 127:2000
Estado tensional por las acciones externas 			IET-80	ATV 127:2000	AWWA M45 ó ATV 127:2000
Deformación por la carga combinada 				ATV 127:2000	
Deformación por las acciones externas 	Spangler ó F-70:2001	Spangler		ATV 127:2000	AWWA M45 ó ATV 127:2000
Pandeo o colapsado		Luscher		ATV 127:2000	Luscher
Normativa	UNE-EN 545:1995 ó F-70:2001	Manual AWWA M11	IET-80	UNE 53331:1997 IN	AWWA M45



Tubos con funcionamiento en lámina libre



Las comprobaciones de las deformaciones causadas por las acciones externas en los tubos de fundición y de materiales plásticos, así como la verificación del estado tensional en estos tubos plásticos es tal como se indicó en el apartado anterior.

En los tubos rígidos se trata de comprobar que las cargas totales que solicitan al tubo (derivadas de la acción del terreno y del tráfico si la hubiere) es inferior a la carga de rotura al aplastamiento del tubo, disminuida por un factor de seguridad que debe tener en cuenta el tipo de apoyo de la tubería.

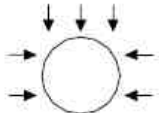
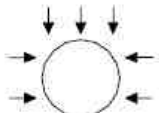


ABASTECIMIENTO DE AGUAS

Tema 14. Cálculos mecánicos de tuberías



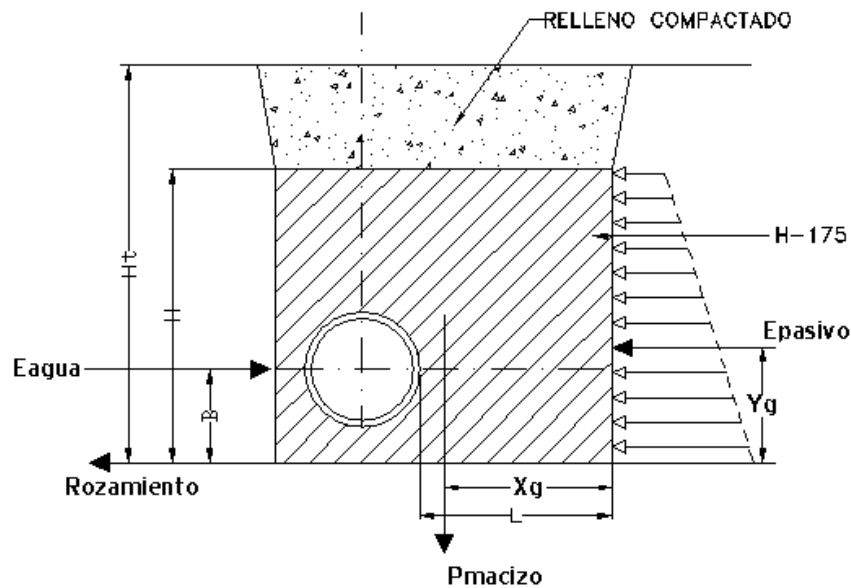
En la siguiente tabla se recogen los métodos habituales empleados en España para el dimensionamiento mecánico de tuberías en lámina libre:

<i>Solicitud</i>	<i>Tubos de fundición</i>	<i>Tubos de hormigón</i>	<i>Tubos de PVC y PE</i>	<i>Tubos de PRFV</i>
<i>Estado tensional por las acciones externas</i> 		$W_{\text{total}} < W_{\text{rotura}}/C$	ATV	AWWA M45 ó ATV
<i>Deformación por las acciones externas</i> 	Spangler		ATV	Spangler ó ATV
<i>Normativa</i>	UNE-EN 598	UNE 127010	UNE 53331:1997 IN	AWWA C 950

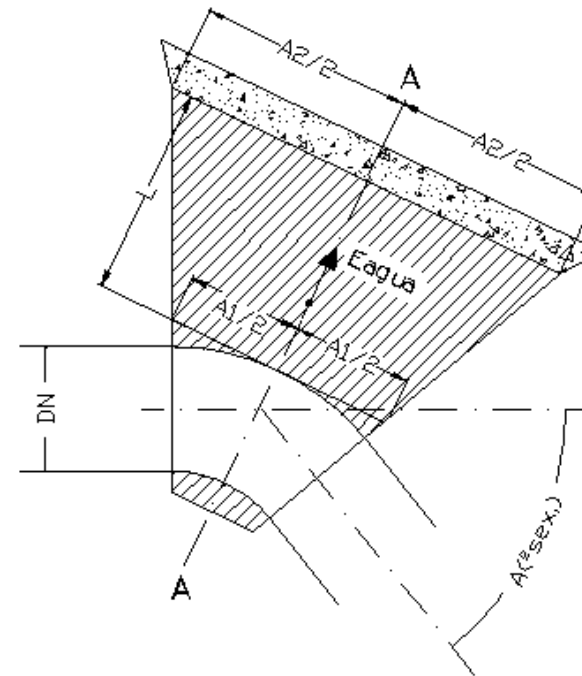


6. ANCLAJES EN TUBERÍAS

Todos los componentes de la conducción que puedan estar sometidos a empujes por efecto de la presión hidráulica tales como codos, derivaciones, conos de reducción, etc. deberán anclarse a un macizo de hormigón armado que contrarreste el empuje y asegure la inmovilidad de los mismos.



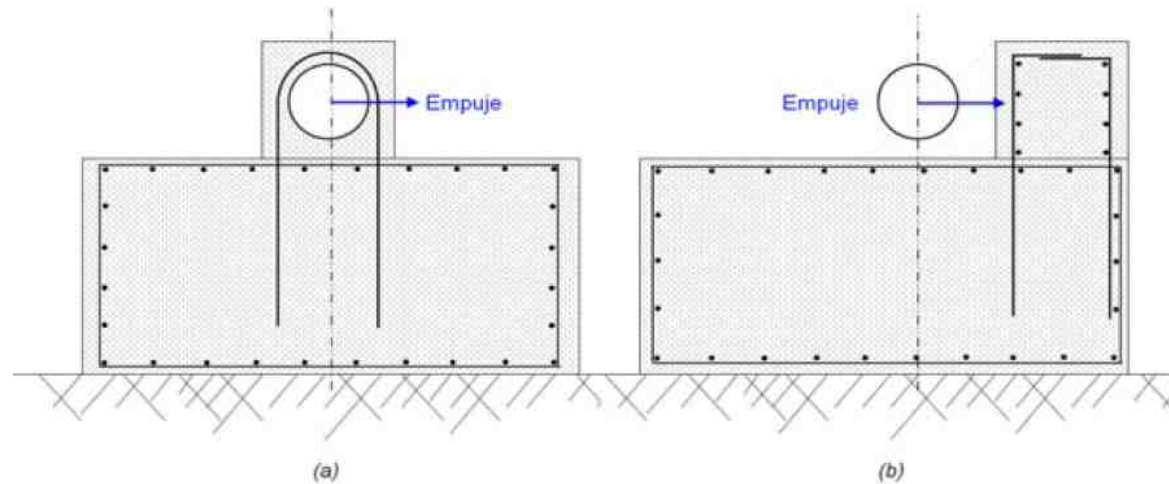
SECCION A-A



PLANTA



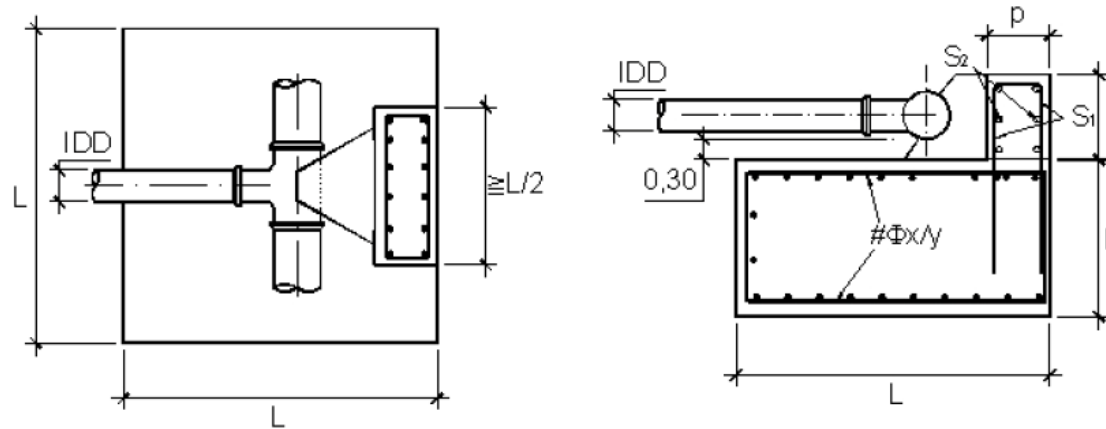
En cuanto a los elementos de anclaje al macizo, se contemplan dos posibilidades:



- 1) Mediante horquillas de acero
- 2) Mediante dado excéntrico de hormigón armado

En el caso de disponer horquillas, tanto la tubería como la horquilla que la abraza se embutirán en un dado de hormigón de recubrimientos mínimos centrado en el macizo .

La ejecución de estos elementos, debe realizarse de forma que las uniones queden al descubierto.



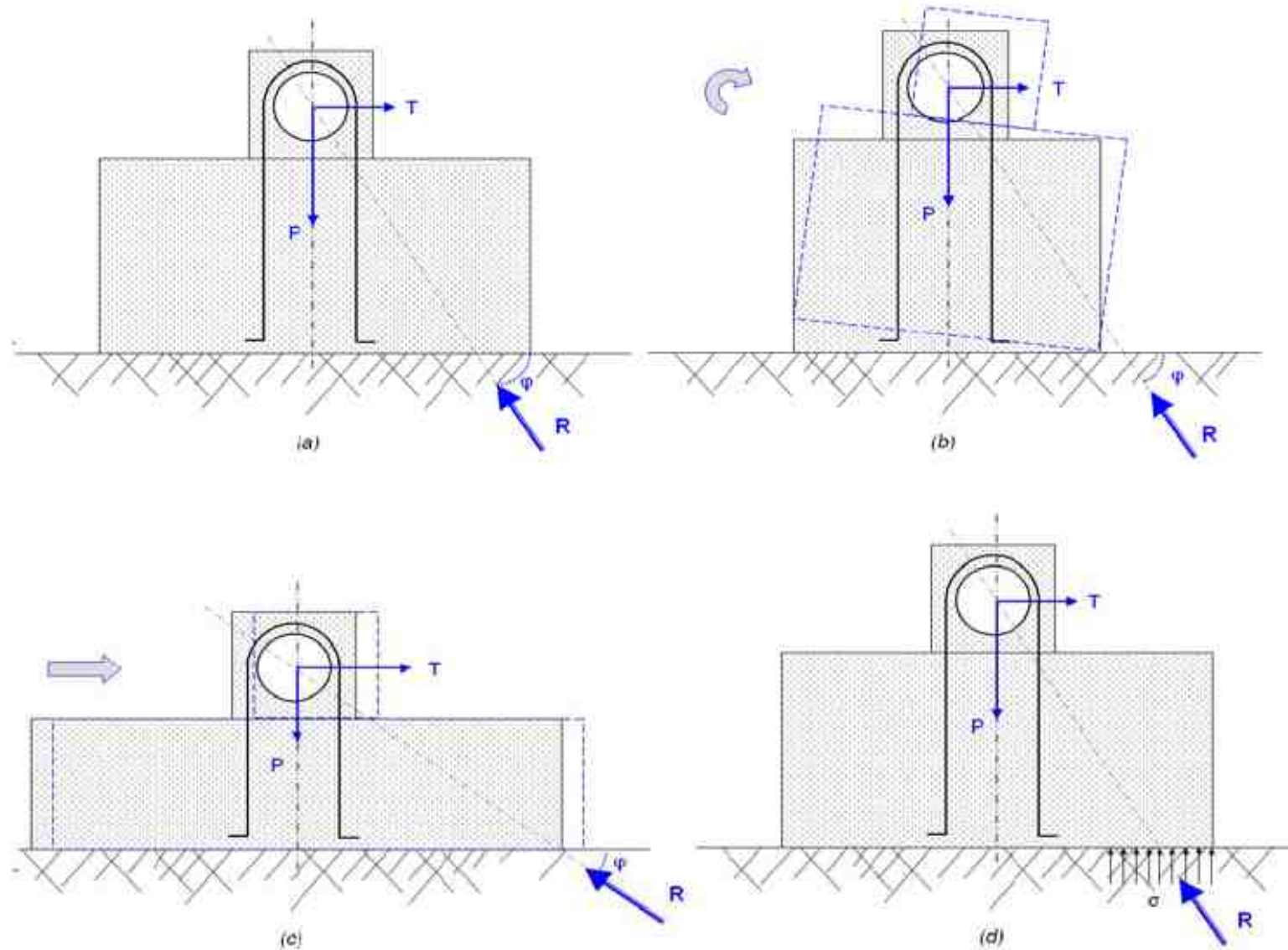
Los macizos de anclaje son grandes dados de hormigón cuyo peso P inclina el empuje T hacia el terreno (*diapositiva 40, figura a*). Se calculan las dimensiones necesarias del dado para:

- 1) Situar la reacción R dentro de la superficie del macizo (comprobación al vuelco) (*diapositiva 40, figura b*).
- 2) Comprobar que el ángulo φ de la reacción es menor que el de rozamiento entre el macizo y el terreno (comprobación de deslizamiento), (*diapositiva 40, figura c*).
- 3) Comprobar que el suelo es capaz de desarrollar la reacción R sin romper (comprobación de tensiones en el terreno), (*diapositiva 40, figura d*).



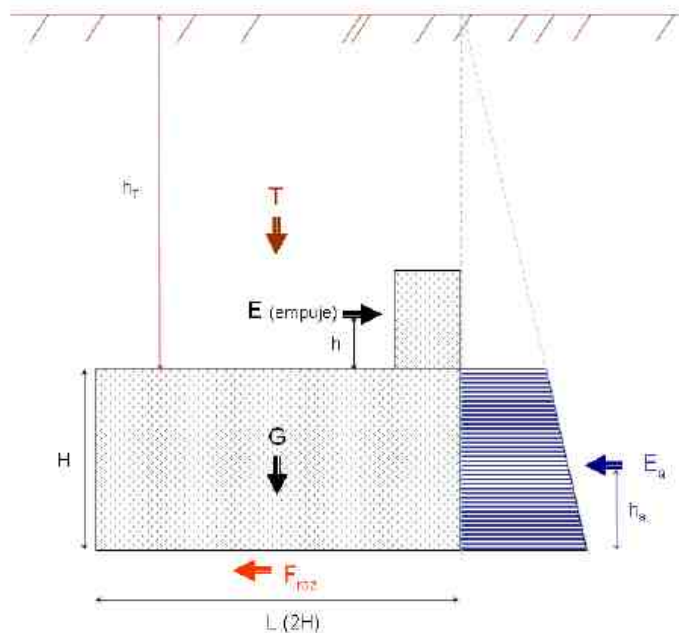
ABASTECIMIENTO DE AGUAS

Tema 14. Cálculos mecánicos de tuberías





El esquema general de las fuerzas actuando en el macizo, y la formulación básica de partida es la siguiente:



Coefficiente de seguridad frente al deslizamiento:

$$C_s = \frac{F_{estabilizadoras}}{F_{desestabilizadoras}} \geq 1,50$$

Coefficiente de seguridad frente al vuelco:

$$C_v = \frac{M_{estabilizadores}}{M_{desestabilizadores}} \geq 1,80$$

Una vez dimensionado el macizo y garantizado su comportamiento frente a deslizamiento y vuelco, se comprobará que el terreno admite las presiones resultantes. Es decir, se calcularán las tensiones transmitidas comprobándose que en ningún caso superan las admisibles por el terreno.



8. BIBLIOGRAFÍA

CEH – CEDEX. *Guía técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión*. 6ª ed. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2009. 442 p. ISBN: 9788477904922 .

HERNÁNDEZ MUÑOZ, A. *Abastecimiento y distribución de aguas*. 4ª ed. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2000. 914 p. Colección Señor nº 6. ISBN: 84-380-0165-3.

LIRIA MONTAÑÉS, J. *Proyecto de distribución de agua en poblaciones*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1995. 278 p. Colección Señor nº 1. ISBN: 978-84-380-0081-6.

VICENTE MÉNDEZ, M. *Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua*. Caracas: Publicaciones UCAB, 2007. ISBN: 980-244-106-6.



ABASTECIMIENTO DE AGUAS

Tema 14. Cálculos mecánicos de tuberías



REFERENCIA DE IMÁGENES

DIAPOSITIVA PORTADA

[Imagen tomada de] “Services. Utility construction”. *Eastern Tank & Utilities Inc.* [en línea]. Disponible en: <http://easterntankinc.com/yahoo_site_admin/assets/images/pipes1.68210528.jpg>. [Consulta: 20 de febrero de 2011]

DIAPOSITIVA página 6

“Tubo PRFV en zanja” [Imagen tomada de] *Wikipedia, la enciclopedia libre* [en línea]. Disponible en: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/92/Tubo_PRFV_en_zanja.jpg>. [Consulta: 9 de enero de 2012]

DIAPOSITIVA página 7

“Comportamiento flexible o rígido en los tubos de fundición”. En: CEH – CEDEX. *Guía técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión*. 6ª ed. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2009. 442 p. ISBN: 9788477904922. Página 228

DIAPOSITIVA página 10

[Imagen tomada de] “PVC Pressure Pipe Systems”. *Vinidex* [en línea]. Disponible en: <http://www.vinidex.com.au/images/_mg_2426.jpg>. [Consulta: 9 de enero de 2012]

DIAPOSITIVA página 11

[Imagen tomada de] “Pipeline surveys”. *Total Surveys* [en línea]. Disponible en: <<http://www.totalsurveys.co.uk/Portals/0/images/Pipeline-2.jpg>>. [Consulta: 9 de enero de 2012]



ABASTECIMIENTO DE AGUAS

Tema 14. Cálculos mecánicos de tuberías



DIPOSITIVA página 14

“Hipótesis pésima de carga habituales en los diferentes tipos de tubos a presión en instalaciones enterradas”. En: CEH – CEDEX. *Guía técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión*. 6ª ed. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2009. 442 p. ISBN: 9788477904922. Página 234

DIPOSITIVA página 16

“Curvas de rotura por la acción conjunta de la presión interior y las cargas externas”. En: CEH – CEDEX. *Guía técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión*. 6ª ed. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2009. 442 p. ISBN: 9788477904922. Página 236

DIPOSITIVA página 18

“PVC Piping 2” [Imagen tomada de] “Sample Remote Visual Testing Report”. *Maverick Inspection* [en línea]. Disponible en:
<<http://www.maverickinspection.com/LinkClick.aspx?fileticket=sC6srA1eM1A%3d&tabid=101>>.
[Consulta: 9 de enero de 2012]

DIPOSITIVA página 19

“Hipótesis pésima de carga habituales en los diferentes tipos de tubos en instalaciones enterradas en lámina libre” [Imagen tomada de] “Cálculo mecánico”. *Curso sobre diseño e instalación de tuberías para el transporte de agua* [en línea]. Disponible en:
<<http://web.usal.es/~balairon/Paginawebtuberias/calculomecanico.pdf>>. [Consulta: 9 de enero de 2012]



DIPOSITIVA página 21

[Imagen tomada de] PÉREZ FARRAS, L. *Nociones sobre cálculo estructural de conducciones enterradas* [en línea] Buenos Aires: Facultad de Ingeniería de la UBA, 2003. Pagina 13. Disponible en: <<http://escuelas.fi.uba.ar/iis/Calculo%20Estructural.pdf>>. [Consulta: 20 de febrero de 2011]

DIPOSITIVA página 24

[Imagen tomada de] “Blackpool water burst finally fixed”. *United Utilities* [en línea]. Disponible en: <http://www.unitedutilities.com/Images/Water.pipes.Common_Edge_Rd.Blackpool.JPG>. [Consulta: 9 de enero de 2012]

DIPOSITIVA página 27

“La tubería, de estructura laminar, es prácticamente indestructible y de una larga vida útil” [Imagen tomada de] “Molecor fabrica el tubo de PVC-O “más grande del mundo”. *Interempresas* [en línea]. Disponible en: <<http://img.interempresas.net/fotos/392131.jpeg>>. [Consulta: 9 de enero de 2012]

DIPOSITIVA página 28

“Métodos habituales de cálculo de las acciones del terreno y del tráfico en tuberías enterradas en España”. En: CEH – CEDEX. *Guía técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión*. 6ª ed. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2009. 442 p. ISBN: 9788477904922. Página 242

DIPOSITIVA página 34

“Métodos habituales para el dimensionamiento de tuberías enterradas en España”. En: CEH – CEDEX. *Guía técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión*. 6ª ed. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2009. 442 p. ISBN: 9788477904922. Página 246



ABASTECIMIENTO DE AGUAS

Tema 14. Cálculos mecánicos de tuberías



DIAPPOSITIVA página 35

“Instalación de tubería de PRFV” © Francisco Javier Pérez de la Cruz

DIAPPOSITIVA página 36

“Métodos habituales para el dimensionamiento de tuberías en lámina libre en España” [Imagen tomada de] “Cálculo mecánico”. *Curso sobre diseño e instalación de tuberías para el transporte de agua* [en línea]. Disponible en: <<http://web.usal.es/~balairon/Paginawebtuberias/calculomecanico.pdf>>. [Consulta: 9 de enero de 2012]

DIAPPOSITIVA página 37

“Anclajes en tuberías” © Juan García Bermejo

DIAPPOSITIVA página 38

“Anclajes: horquilla y dado excéntrico” [Imagen tomada de] “Anexo 1M. NAACYII – 001. 2010. Anclaje de conducciones a presión”. *Normas para el abastecimiento de agua NAACYII – Revisión 2004* [en línea]. Disponible en: <http://www.cyii.es/cyii.es/archivos/es/comunicacion/ANEXO_1M_NAACYII_001_2010_Anclaje_Conducciones_Presion.pdf>. [Consulta: 9 de enero de 2012]

DIAPPOSITIVA página 39

“Codo horizontal” [Imagen tomada de] “Anexo 1M. NAACYII – 001. 2010. Anclaje de conducciones a presión”. *Normas para el abastecimiento de agua NAACYII – Revisión 2004* [en línea]. Disponible en: <http://www.cyii.es/cyii.es/archivos/es/comunicacion/ANEXO_1M_NAACYII_001_2010_Anclaje_Conducciones_Presion.pdf>. [Consulta: 9 de enero de 2012]



ABASTECIMIENTO DE AGUAS

Tema 14. Cálculos mecánicos de tuberías



DIAPOSITIVA página 40

“Macizo de anclaje” [Imagen tomada de] “Anexo 1M. NAACYII – 001. 2010. Anclaje de conducciones a presión”. *Normas para el abastecimiento de agua NAACYII – Revisión 2004* [en línea]. Disponible en: <http://www.cyii.es/cyii.es/archivos/es/comunicacion/ANEXO_1M_NAACYII_001_2010_Anclaje_Conducciones_Presion.pdf>. [Consulta: 9 de enero de 2012]

DIAPOSITIVA página 41

“Esquema de fuerzas” [Imagen tomada de] “Anexo 1M. NAACYII – 001. 2010. Anclaje de conducciones a presión”. *Normas para el abastecimiento de agua NAACYII – Revisión 2004* [en línea]. Disponible en: <http://www.cyii.es/cyii.es/archivos/es/comunicacion/ANEXO_1M_NAACYII_001_2010_Anclaje_Conducciones_Presion.pdf>. [Consulta: 9 de enero de 2012]

DIAPOSITIVA página 42 y sucesivas

[Imagen tomada de] “Lunes de Mitos: Debes beber al menos 8 vasos de agua al día” [Blog de] *Francesc Josep* [en línea]. 5 de octubre de 2009. Disponible en: <http://www.francescjosep.net/wp-content/uploads/2009/10/vaso_agua_herbalife1.jpg>. [Consulta: 1 de julio de 2011]

DIAPOSITIVA página 43

“Tabla 8. Dimensiones de los tubos de fundición dúctil”. En: CEH – CEDEX. *Guía técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión*. 6ª ed. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2009. 442 p. ISBN: 9788477904922. Página 61



ABASTECIMIENTO DE AGUAS

Tema 14. Cálculos mecánicos de tuberías



DIPOSITIVA página 47

“Zanja con paredes inclinadas” [Imagen tomada de] GALVEZ CRUZ, D. *Cálculo estructural de tuberías enterradas por el método de los elementos finitos* [en línea] Madrid: Escuela Técnica Superior de Ing. De Caminos, Canales y Puertos, 2011. Pagina 59. Disponible en: http://oa.upm.es/7753/1/DANIEL_GALVEZ_CRUZ.pdf. [Consulta: 20 de febrero de 2011]

DIPOSITIVA página 50

“Tabla 82. Rigideces diametrales mínimas y deformaciones diametrales admisibles”. En: CEH – CEDEX. *Guía técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión*. 6ª ed. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2009. 442 p. ISBN: 9788477904922. Página 251